

УДК 621.396.96

В.Н. Быков¹, Д.Д. Иванченко¹, Н.Н. Колчигин¹, В.А. Краюшкин¹,
Г.Г. Осинский², В.Н. Радзиховский³¹ Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Харьков² Государственное предприятие «КБ «Южное», Днепропетровск³ Государственный научно-исследовательский центр «Айсберг», Киев

МАЛОГАБАРИТНЫЕ ВСЕПОГОДНЫЕ ДАТЧИКИ ВНЕШНЕГО ПОЛЯ ДЛЯ СИСТЕМ НАВИГАЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Обоснованы пути практической реализации малогабаритных информационных датчиков внешнего поля, которые могут быть использованы в высокоточных всепогодных системах навигации летательных аппаратов различного назначения. Разработаны принципы построения матричных радиометрических корреляционно-экстремальных систем миллиметрового диапазона, предназначенных для формирования и обработки изображений наземных объектов за малое время экспозиции (доли секунды).

Ключевые слова: летательный аппарат, матричная радиометрическая корреляционно-экстремальная система навигации, миллиметровый диапазон.

Введение

Постановка проблемы и анализ литературы.

К системам навигации летательных аппаратов (ЛА), в частности высокоскоростных ЛА (сверхзвуковых самолетов, ракет, беспилотных ЛА), предъявляются, зачастую противоречивые, тактико-технические требования [1 – 4]:

- высокая точность измерения координат визируемых объектов – единицы метров;
- высокое быстродействие – доли секунд, то есть работа в реальном масштабе времени;
- всепогодность функционирования, то есть надежное функционирование в неблагоприятных погодных-климатических условиях, днем и ночью;
- высокая помехозащищенность (скрытность), то есть отсутствие или ограниченное время работы на излучение;
- минимальные габаритно-массовые и стоимостные характеристики;
- возможность реализации на отечественной элементной базе.

В качестве наземных объектов – ориентиров навигации выступают площадные, протяженные или «точечные» малоразмерные стационарные и подвижные объекты (природные образования, искусственные сооружения, подвижные объекты-реперы). Навигация по таким объектам осуществляется с помощью корреляционно-экстремальных систем навигации (КЭСН) путем анализа двумерных изображений объектов, формируемых информационными датчиками систем [5 – 7]. При этом мгновенная зона обзора системы может быть достаточно большой. Применение в данном случае сканирующих КЭСН малоэффективно, так как при этом не обеспечивается требуемое высокое быстродействие работы систем.

Формирование и обработка радиометрических изображений на борту высокоскоростных ЛА возмож-

ны благодаря применению многоканальных, так называемых, матричных радиометрических КЭСН [4].

Перечисленным требованиям в той или иной мере отвечают пассивные либо пассивно-активные радиометрические (РМ) системы миллиметрового диапазона (ММД). К этому имеются следующие предпосылки [4].

Создание РМ систем по принципу корреляционно-экстремальной навигации позволяет обеспечить требуемую точность местоопределения и высокую вероятность визирования, обнаружения и идентификации наземных объектов.

Матричное построение РМ КЭСН позволяет обеспечить требуемое высокое быстродействие, при этом реализуется максимальная флуктуационная чувствительность отдельных парциальных РМ приемников, входящих в состав матричного РМ датчика. К тому же снижается вероятность выхода визируемого объекта из зоны видимости системы при эволюциях ЛА по углу тангажа и крена.

Создание пассивных, пассивно-активных РМ КЭСН обеспечивает высокую скрытность и помехозащищенность функционирования КЭСН. Применение пассивно-активных систем повышает дальность функционирования КЭСН.

Создание КЭСН в ММД обеспечивает всепогодность функционирования, аппаратную надежность, минимальные габаритно-массовые и стоимостные характеристики.

Целью данной статьи является определение путей практической реализации малогабаритных информационных датчиков миллиметрового диапазона, применение которых в матричных радиометрических корреляционно-экстремальных системах навигации позволит обеспечить высокие показатели точности, всепогодности, помехозащищенности функционирования систем навигации высокоскоростных летательных аппаратов.

Основной раздел

Принципы построения матричных радиометрических датчиков

Матричный радиометрический датчик (РМД) представляет собой многоканальную (матричную) систему, каждый канал которой обеспечивает измерение в течение заданного времени наблюдения кажущейся радиояркостной температуры визируемой поверхности в пределах одного разрешаемого элемента поверхности. Совокупность каналов РМД параллельно или последовательно во времени формирует кадр (изображение).

Матричный радиометрический датчик включает два принципиально необходимых элемента:

- многолучевую антенну (подсистему пространственно-временной обработки сигнала), обеспечивающую обзор и пространственную селекцию поля радиотеплового излучения, и его преобразование в непосредственно измеряемую величину – антенную температуру;

- матричный радиометрический приемник (подсистему первичной обработки сигнала), позволяющий измерять антенную температуру с требуемой чувствительностью и точностью;

- РМД дополняется подсистемой вторичной обработки сигналов – спецвычислителем, осуществляющим формирование и обработку изображений.

Охарактеризуем основные элементы матричного РМД ММД, который может явиться основой для КЭСН высокоскоростных летательных аппаратов.

Принципы построения многолучевых антенн ММ диапазона

Получение плоских двумерных изображений объектов на борту высокоскоростного ЛА возможно благодаря применению либо сканирующих, либо многолучевых апертурных антенных систем (линзовых или параболических антенн). Создание многолучевых, в частности матричных, антенн, по указанным выше причинам, является предпочтительным. Сложность создания матричных антенн связана с трудностями технического и технологического характера, которые обусловлены необходимостью компоновки большого количества облучателей в фокусе антенны при условии сохранения требуемых электрических характеристик антенны.

К антенному устройству РМ КЭСН предъявляются следующие требования [4]:

- максимально возможный коэффициент направленного действия (КНД) и коэффициент использования раскрыва антенны;

- игольчатая парциальная диаграмма направленности антенны (ДНА);

- минимальный уровень боковых лепестков ДНА;

- высокий коэффициент полезного действия антенно-фидерного тракта;

- возможность формирования многолучевой (линейной или матричного типа) групповой ДНА;

- небольшие габариты и масса.

Выбор оптимального значения коэффициента перекрытия парциальных ДНА является определяющим при формировании групповой ДНА, для оценки уровня боковых лепестков ДНА, коэффициента направленного действия антенны, амплитудных, фазовых и других искажений ДНА. В известных работах [1 – 3] приведены сведения о возможности создания матричных РМ систем ММД, используемых в целях обнаружения и идентификации наземных объектов. В работе [2] представлен пример компоновки группового облучателя антенны 8 мм диапазона, содержащего $4 \times 8 = 32$ элемента. Для компоновки такого количества облучателей в данной работе были задействованы две антенны большого диаметра – зеркальная параболическая антенна диаметром $d_a = 900$ мм и линзовая диэлектрическая антенна $d_a = 600$ мм. В качестве РМ приемников в этой системе используются приемники прямого усиления.

Для построения антенн сравнительно малого диаметра ($d_a \leq 300$ мм) с групповым облучателем большой размерности (например, 8×8 мм элементов) должны быть выполнены следующие противоречивые требования:

- обеспечение компактного размещения большого количества облучателей в фокусе антенны, не приводящее к затенению «раскрыва» антенны, и появлению «переливов» энергии за края апертуры;

- обеспечение требуемого уровня пересечения лучей ДНА с обеспечением при этом высокого пространственного разрешения отдельных лучей и малого уровня боковых лепестков.

Анализ различных типов многолучевых антенн [1 – 4, 8 – 10] позволяет сделать вывод о целесообразности применения в матричных РМ КЭСН антенн гибридного типа. Фокусирующим элементом таких антенн являются: однозеркальная параболическая длиннофокусная антенна, либо двухзеркальная короткофокусная антенна типа Кассегрена, а также диэлектрическая (либо металлопластинчатая, волноводная) линзовая антенна.

Групповой облучатель может быть выполнен в виде антенной решетки с числом элементов равным количеству парциальных лучей ДНА. При этом зеркало или линза служат для создания достаточно узкой ДНА игольчатого типа, а групповой облучатель – для создания веерной ДНА требуемой формы.

Оцениваемыми характеристиками группового облучателя являются:

- уровень боковых лепестков ДН отдельных облучателей,

- КНД отдельных лучей ДН,

- форма ДН парциальных облучателей,

- уровень амплитудных и фазовых искажений ДНА,

– габаритно-массовые характеристики облучателя.

Немаловажным является вопрос технической реализации многолучевой антенной системы с матричным радиометром ММД.

Рабочая площадь РМ приемников имеет конечные размеры, что ограничивает разрешающую способность, т.к. расстояние между центрами соседних РМ в матрице не удастся сделать меньше их собственных размеров.

Параметрический синтез антенной системы позволяет учитывать электродинамические особенности формирования многолучевой ДНА и требования к точности местоопределения РМ КЭСН. Вариант решения данного вопроса приведен в работе [11]. В указанной работе ускоряющая двояковогнутая линза ММД выполнялась в виде обоймы шестигранных металлических волноводов. Для уменьшения веса и габаритов предлагалось осуществить зонирование линзы. В качестве облучателя предлагалось использовать матричный волноводный облучатель либо в виде открытого конца волновода, либо с применением диэлектрических стержневых излучателей.

Двухзеркальная антенна Кассегрена состоит из облучателя, параболического зеркала или рефлектора и небольшого гиперболического зеркала – субрефлектора. Принцип действия антенны Кассегрена заключается в том, что сферическая волна облучателя преобразуется с помощью последовательного отражения от двух зеркал в плоскую волну в фокальной плоскости рефлектора (апертуре), где и формируется синфазное амплитудное распределение [8].

В основных схемах двухзеркальных антенн (Кассегрена и Грегори), а также в их модификациях улучшение амплитудного распределения достигается не только выбором ДН облучателя и фокусного расстояния зеркала (как в однозеркальных параболических антеннах), но и подбором параметров субрефлектора и коррекцией его профиля совместно с профилем основного зеркала (рефлектора).

Двухзеркальные антенны имеют следующие достоинства: улучшенная структура бокового излучения за счет дифракции на краях, максимум которого ориентирован в верхнюю («малошумящую») область; возможность применения эффективных облучателей и облучающих систем, обеспечивающих широкополосную работу и многоцелевое использование антенны; уменьшение потерь на «переливание» и кросс-поляризацию.

Немаловажным преимуществом рассматриваемых антенн является удобная компоновка облучателя и следующих за ним приемных модулей, при которой уменьшается длина волноводного тракта и снижаются потери в фидерной системе.

В двухзеркальной системе проще реализовать режим конического сканирования либо обзор визируемой поверхности с помощью матричного группового облучателя.

К недостаткам двухзеркальных антенн следует отнести затенение субрефлектором, ограничения по применению в длинноволновом радиодиапазоне, сравнительно высокую конструктивную сложность и стоимость.

На рис. 1 показаны элементы двухзеркальной антенны и расчетные параметры.

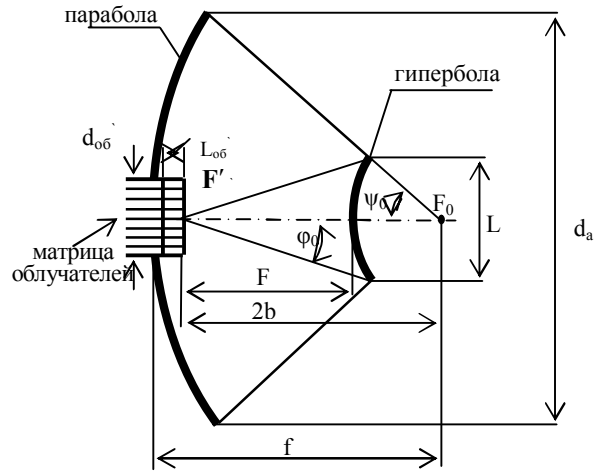


Рис. 1. Схема двухзеркальной антенны

Сущность методики расчета характеристик двухзеркальной антенны Кассегрена состоит в следующем [12]. Заданными величинами при расчете характеристик двухзеркальной антенны для случая размещения антенны на борту ЛА с ограниченной площадью миделевого сечения являются:

- рабочая длина волны λ ;
- размеры (диаметр) антенны d_a (рефлектора).

Искомыми характеристиками являются следующие:

- диаметр гиперболического субрефлектора L ;
- апертурные углы параболического рефлектора и гиперболического субрефлектора ψ_0 , ϕ_0 ;
- фокусное расстояние параболического рефлектора и расстояние между фокусами гиперболы f , $2b$;
- расстояние от фазового центра облучателя до вершины субрефлектора $F = b \frac{e+1}{e}$, для гиперболы эксцентриситет $1, 2 \leq e < 2$.

В итоге расчета указанных характеристик уточняются ширина ДН и КНД антенны.

В итоге расчета указанных характеристик уточняются ширина ДН и КНД антенны.

Далее обосновывается выбор типа группового облучателя для многолучевой антенны ММД. Анализ возможных типов облучателей для матричных антенн [8 - 10, 12] показывает, что традиционные типы облучателей (рупор, открытый конец волновода) по условиям направленности и компактности упаковки не удовлетворяют существующим требованиям.

Облучатели в виде щелевых антенн. Наиболее приемлемыми являются облучатели в виде щелевых антенн осевого излучения и диэлектрические стержневые антенны. В обоих типах антенн фазовая

скорость волны V , распространяющейся вдоль антенны, меньше скорости света $\left(\frac{c}{V} \geq 1\right)$ и главный лепесток ДН ориентирован вдоль оси антенны. Внешний вид облучателя, представляющего собой щелевую антенну с постоянной шириной щели (антенна Вивальди) на диэлектрической подложке, показан на рис. 2.

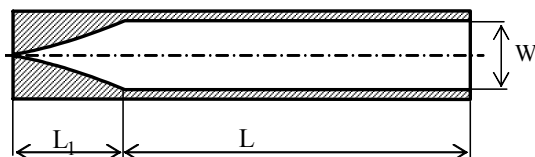


Рис. 2. Антенна Вивальди

На рис. 3 показана щелевая антенна (3), которая запитывается через коаксиально-волноводный переход (1) пирамидальным рупором (2).

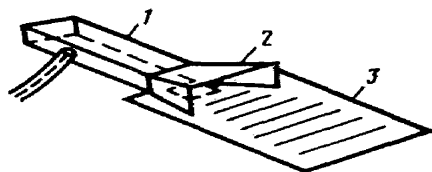


Рис. 3. Щелевая антенна, запитываемая рупором

На рис.4а представлен внешний вид фрагмента матрицы облучателей для двухзеркальной антенны Кассегрена на длину волны $\lambda = 8,6$ мм.

Матрица представляет собой гексагональную конструкцию и состоит из 71 облучателя, общий размер матрицы (64×68), мм². Облучатель – стандартный прямоугольный волновод с сечением (7,2×3,4), мм², оканчивающийся расширяющейся диэлектрической щелью с поперечным размером 11 мм. На рис. 4б показан пример взаимного расположения ДН отдельных облучателей, соответствующего размещению облучателей на рис. 4, а.

Щелевые антенны разрабатываются с помощью технологии напыления металла на диэлектрик. При этом обеспечивается высокая степень идентичности парциальных облучателей антенны.

Облучатели в виде диэлектрических стержневых антенн. Наиболее перспективный тип антенн поверхностных волн, которые могут быть использованы в качестве излучателей для матричного облучателя многоэлементной антенны, являются диэлектрические стержневые антенны (ДСА). ДСА представляет собой стержень из диэлектрика длиной L , возбуждаемый круглым или прямоугольным волноводом. Антенна формирует осевое излучение за счет возбуждения бегущей поверхностной волны на границе раздела диэлектрик – воздух.

Для согласования волновода с диэлектриком стержень антенны имеет конусный переход (рис. 5) L_n , выполняющий роль трансформатора сопротив-

ления, а величина L_0 выбирается из конструктивных соображений.

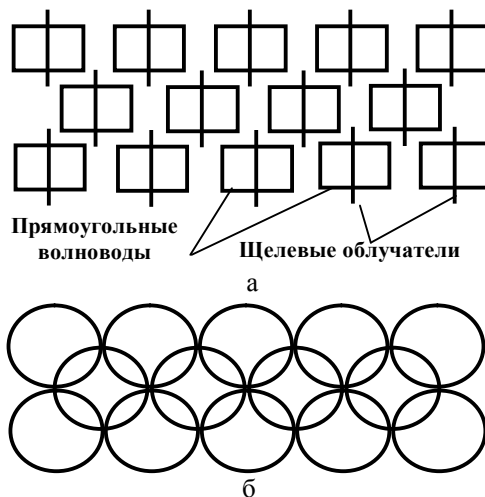


Рис. 4. Фрагмент матрицы облучателей в виде щелевых антенн – а; пример взаимного расположения ДН отдельных облучателей – б

Длина антенны обычно выбирается в пределах $\frac{L_{об}}{\lambda} \leq 4 \dots 8$ поскольку дальнейшее увеличение размера $L_{об}$ неэффективно из-за спадания амплитудного распределения за счет потерь на излучение и нагрев диэлектрика, что приводит к снижению КНД.

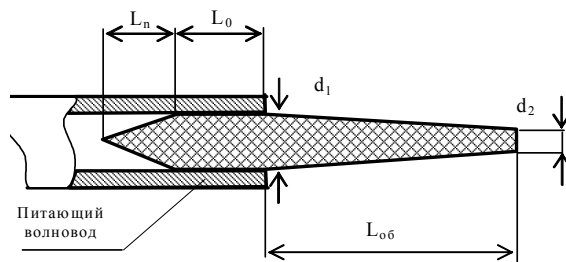


Рис. 5. Диэлектрический стержневой облучатель

На рис. 6 приведен пример компоновки группового (матричного) диэлектрического стержневого облучателя.

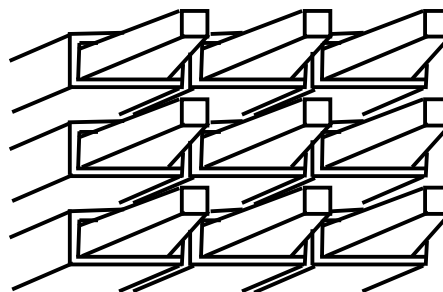


Рис. 6. Эскиз матричного диэлектрического стержневого облучателя

На рисунке показано, что парциальные облучатели соприкасаются малыми стенками волноводов. Для удобства на рисунке показано, что волноводы отдельных облучателей большими стенками не со-

прикасаются. Взаимное расположение ДН отдельных облучателей такое же, как и на рис. 4, б.

Приведем результаты расчета основных характеристик двухзеркальной антенны Кассегрена с диаметром основного зеркала – рефлектора $d_a = 300$ мм на длине волны $\lambda = 8,6$ мм [4]. Так, максимальные размеры группового облучателя размерностью $8 \times 8 = 64$ элементов, при условии построения группового облучателя в виде обоймы волноводов, открытые концы которых дополнены диэлектрическими сужающимися стержневыми вставками (рис. 5), составляют (по большой стенке стандартного волновода $a \times b = 7,2 \text{ мм} \times 3,4 \text{ мм}$) $d_{об} = 57,6$ мм. Размеры вырезки в рефлекторе соответствуют размерам группового облучателя, которые с учетом толщины большой стенки волновода, несколько превышают диаметр субрефлектора $L = 60,9 \text{ мм} \leq 72 \text{ мм}$.

Длина диэлектрических облучателей, при условии согласования ДН парциального облучателя с размерами субрефлектора (отсутствие «переливов» за края субрефлектора), составляет $L_{об} = 25,8$ мм. При этом расстояние от фазового центра облучателя до вершины субрефлектора $F = 43,6$ мм, то есть облучатель конструктивно может быть размещен между двумя зеркалами. Затенение субрефлектором основного зеркала – рефлектора, по соотношению площадей, на 4,6 % несколько снижает коэффициент направленного действия основного зеркала, который составляет $G \geq 7 \times 10^3$. Ширина ДН парциальных лучей составляет $2\theta_{0,5}^0 = 2^0$.

Принципы построения матричных радиометрических приемников ММ диапазона

Принципы построения матричных радиометрических приемников ММ диапазона:

- создание матрицы радиометрических приемников, количество которых равно числу парциальных диаграмм направленности многолучевой антенны (числу разрешаемых элементов); при этом реализуется максимальная флуктуационная чувствительность каждого отдельного канала;

- уплотнение канальных сигналов на один усилительно-преобразовательный тракт радиометрического приемника с последующим разделением по форме сигналов.

Радиометрический приемник строится либо по супергетеродинной схеме, либо как приемник прямого усиления.

Построение РМ приемника по схеме прямого усиления, вследствие появившейся в последнее время технологической возможности создания малошумящих усилителей высокой частоты в ММД, из конструктивных соображений, наилучшим образом подходит для создания матричного РМД [1 – 3].

Функциональная схема РМ приемника прямого усиления 8 мм диапазона разработки ОАО НПП «Сатурн», г. Киев, представлена на рис. 7.

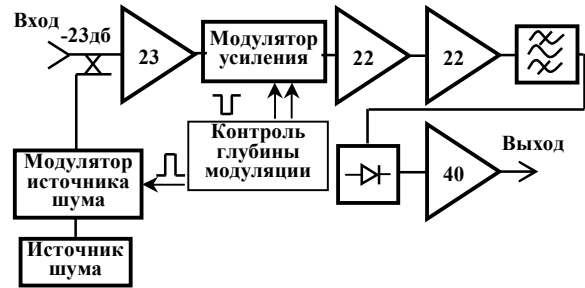


Рис. 7. Функциональная схема РМ приемника прямого усиления 8 мм диапазона

В качестве усилителя высокой частоты на 23 дБ используется 3-каскадный усилитель на полевых транзисторах (РНЕМТ). Модулятор усиления и усилители на 22 дБ выполнены на монолитных микросхемах ММИС. Перед квадратичным детектором стоит семикаскадный фильтр на (27 - 33) ГГц. Усилитель низкой частоты на 40 дБ, на выходе квадратичного детектора, выполнен на интегральной микросхеме ИС.

В табл. 1 приведены основные характеристики данного РМ приемника.

Таблица 1

Характеристики РМ приемника прямого усиления 8 мм диапазона

Коэффициент усиления	63 дБ
Полоса пропускания	27 – 33 ГГц
Коэффициент шума	2,4 дБ
Флуктуационная чувствительность	0,02 К/с
Габаритные размеры	65×24×13 мм ³

На рис. 8 показан внешний вид РМ приемника прямого усиления 3 мм диапазона, разработки ГНИЦ «Айсберг», г. Киев [2, 3].

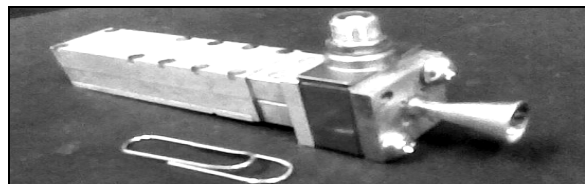


Рис. 8. Внешний вид РМ приемника прямого усиления 3 мм диапазона

Анализ методов уплотнения каналов в многоканальных РМ приемниках

В теории систем передачи информации известны методы частотного, временного уплотнения и разделения каналов, а так же метод линейного уплотнения с разделением каналов по форме сигналов [4].

Метод частотного уплотнения в РМ системах применяется редко, так как технически сложно совместить в одном канале большое количество сигналов с широким спектром.

Метод временного уплотнения требует применения высокоскоростных коммутаторов опроса (подключения) парциальных облучателей антенны к общему приемно-усилительному тракту. Высокая скорость последовательного опроса ограничена

временем накопления сигнала радиометром от каждого парциального облучателя (канала), что диктуется необходимостью реализации требуемой чувствительности РМ приемника. Метод временного уплотнения по быстрдействию подобен методу последовательного обзора пространства.

В работе [4] предложена функциональная схема многоканального РМ приемника с линейным уплотнением каналов по форме сигналов (рис. 9).

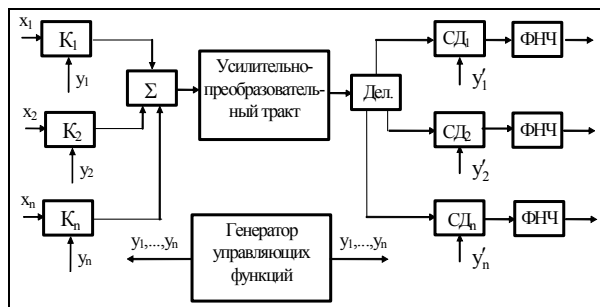


Рис. 9. Функциональная схема многоканального РМ приемника

Данная схема также может быть использована для реализации метода временного уплотнения каналов. Полезный сигнал $x_i, i \in \overline{1, N}$ представляет собой узкополосный нормально распределенный шум с шириной спектра Δf и радиояростной температурой T_{ci} , пропорциональной интенсивности (мощности) излучения визируемого участка поверхности или объекта на входе i -го канала.

С помощью коммутаторов (K_1, K_2, \dots, K_n) сигналы модулируются в каждом канале функциями ($y_1 \dots y_n$), которые должны быть цифровыми и принадлежать ортогональному на интервале $[0, \tau]$ семейству. Далее сигналы всех каналов поступают на вход сумматора и в общий усилительно-преобразовательный тракт, где к сигналу добавляются шумы РМ приемника с мощностью $T_{ш}$.

В случае выполнения приемника по супергетеродинной схеме усилительно-преобразовательный тракт содержит преобразователь частоты (смеситель и гетеродин), усилитель промежуточной частоты (УПЧ) и квадратичный детектор. В случае построения приемника по схеме прямого усиления данный тракт содержит несколько каскадов маломощных усилителей высокой частоты (УВЧ) и квадратичный детектор. В обоих случаях присутствует один тракт приема, преобразования и усиления группового сигнала и таким образом отпадает необходимость в синхронизации гетеродинов отдельных каналов, а так же устраняется взаимное влияние гетеродинов на работу соседних каналов. Источником внутренних шумов приемника служит либо УПЧ, либо УВЧ общего усилительно-преобразовательного тракта.

Устранения нестабильности коэффициентов усиления отдельных каналов в обеих схемах можно добиться за счет построением РМ приемников по

модуляционной схеме.

Далее смесь сигнала и шума, пройдя квадратичный детектор, делится по мощности на N каналов и подается на синхронные детекторы ($СД_1, \dots, СД_n$), на вторые входы которых поступают демодулирующие функции, аналогичные модулирующим функциям ($y_1 \dots y_n$). В фильтре нижних частот (ФНЧ) осуществляется интегрирование сигнала с шумовой структурой за время τ .

В случае временного уплотнения каналов отличие функциональной схемы (рис. 9) состоит в том, что коммутаторы (K_1, K_2, \dots, K_n) подключаются к сумматору последовательно.

Как показано в работе [4], при малом отношении сигнал-шум в каждом канале (что характерно для РМ приемников) оптимальной совокупностью управляющих функций является семейство квазиортогональных функций Уолша. В этом случае чувствительность по каждому каналу соответствует чувствительности модуляционного РМ, и по сравнению с чувствительностью компенсационного РМ падает примерно в два раза.

С учетом ортонормальности функций Уолша сигнал на выходе каждого канала пропорционален интенсивности (мощности) сигнала на входе этого канала.

В результате анализа прохождения сигнала в многоканальном РМ приемнике с уплотнением каналов (рис. 9), проведенного в работе [4], получено выражение для дисперсии сигнала на выходе многоканального радиометра для случая произвольного количества каналов N :

$$D_N = \frac{\Delta f \tau}{4} [N(N+1)T_c^2 + 4NT_c T_{ш} + 4T_{ш}^2] \quad (1)$$

и выражение для полезного сигнала на выходе каждого канала РМ:

$$T_{свых} = T_c \frac{\Delta f \tau}{2} \quad (2)$$

На основании выражений (1), (2) получено выражение для чувствительности многоканального РМ приемника, использующего модулирующие функции Уолша:

$$\delta T = \frac{2 T_{ш}}{\sqrt{\Delta f \tau}} \sqrt{1 + Nq + \frac{N(N+1)}{4} q^2}, \quad (3)$$

где $q = \frac{T_c}{T_{ш}}$ – отношение сигнал-шум на входе каждого канала РМ приемника.

Результаты расчетов чувствительности многоканального РМ приемника приведены на рис. 10.

Расчеты проведены для двух типов РМ приемников: супергетеродинного и прямого усиления при максимальном контрасте на входе РМ $T_c = 300$ К. Для супергетеродинного РМ приемника принято $T_{ш} = 300$ К, $\Delta f = 10^9$ Гц (верхняя пара кривых). Для РМ приемника прямого усиления, исходя из характеристик табл. 1,

принято $T_{ш} = 500 \text{ К}$, $\Delta f = 6 \cdot 10^9 \text{ Гц}$ (нижняя пара кривых). Непрерывные кривые соответствуют случаю $\tau = 0,1 \text{ с}$, а штриховые – случаю $\tau = 0,01 \text{ с}$.

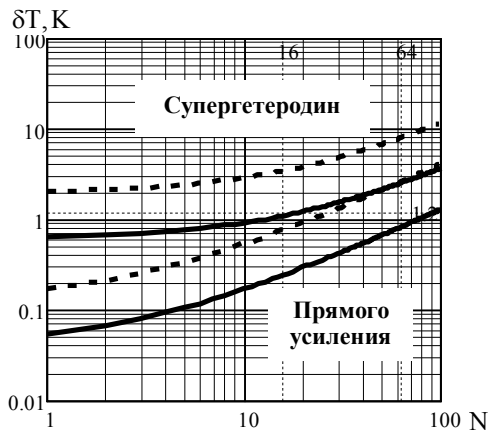


Рис. 10. Графики зависимостей $\delta T(N)$

В работе [4] показано, что оптимальным является количество объединяемых каналов кратное $N = (2^k - 1)$, $k \in \mathbb{N}$. Анализ результатов расчетов (рис. 10) свидетельствует о том, что объединение 64 каналов на один усилительно-преобразовательный тракт приводит к возрастанию межканальных помех и, как следствие к ухудшению чувствительности каждого канала, для супергетеродинного РМ до $\delta T \leq 2,6 \text{ К}$, для РМ прямого усиления до величины $\delta T \leq 0,9 \text{ К}$.

В данном случае целесообразно введение ограничения количества объединяемых каналов на один усилительно-преобразовательный тракт. Так, при объединении, например, 16 каналов на один тракт, чувствительность каждого канала остается достаточно высокой: $\delta T \leq 1,1 \text{ К}$ – для супергетеродинного РМ приемника, $\delta T \leq 0,25 \text{ К}$ – для РМ приемника прямого усиления ($\tau = 0,1 \text{ с}$). В этом случае количество усилительно-преобразовательных трактов при общем количестве каналов в матрице $N = 64$, равно четырем.

Оценка точности определения координат наземных объектов матричными РМ КЭСН

В работе [4] проанализировано влияние шумов соседних каналов на качество обработки изображений, формируемых многоканальными и матричными радиометрическими КЭСН ММД. Критерием оценки качества является точность определения координат наземных объектов. Количественной величиной точности служит среднеквадратическая ошибка (СКО) местоопределения. По результатам работы [4], опуская громоздкие математические выкладки, можно сделать следующие выводы.

Получены аналитические выражения, позволившие осуществить оценки потенциальной точности (СКО) определения координат площадных наземных объектов многоканальными РМ КЭСН с уплотнением

канальных сигналов на основе использования системы функций Уолша. Оценки получены с учетом наличия корреляции канальных сигналов в многоканальной РМ системе, обусловленной частичным пересечением диаграмм направленности парциальных лучей многолучевой антенны, а также с учетом пропуска сигналов через общий усилительно-преобразовательный тракт многоканального приемника.

Показано, что уже при коэффициенте перекрытия парциальных ДНА соседних лучей $d \geq 0,75$ (перекрытие лучей менее чем на половину) коэффициент $r_{x,y} = \delta_R / \delta_M$ (отношение СКО, по двум координатам, для РМ системы с уплотнением каналов к СКО матричной РМ системы) уменьшается от значения $r_{x,y} \geq 4$ до значений $r_{x,y} \geq 2$, то есть существенно снижается влияние взаимной корреляции канальных сигналов, обусловленной пересечением парциальных ДН соседних каналов. СКО местоопределения многоканальной системы приближается к СКО матричной системы.

Влияние на точность местоопределения корреляции сигналов соседних каналов при прохождении через общий усилительный тракт РМ приемника (ДН не пересекаются) заключается в следующем. С увеличением размерности матрицы растет влияние соседних каналов и точность местоопределения ухудшается, однако точность улучшается с увеличением отношения сигнал-шум входных сигналов. Так, увеличение размерности матрицы с $N_1 = N_2 = 4$ до $N_1 = N_2 = 8$ приводит к увеличению СКО примерно в 3 раза. Увеличение отношения сигнал-шум и соответственно контраста пары «объект – фон» с $\Delta T = 3 \text{ К}$ до $\Delta T = 8 \text{ К}$ приводит к снижению СКО также примерно в 3 раза. Учет перечисленных факторов позволяет оптимизировать параметры антенной системы и РМ многоканального приемника КЭСН: коэффициент перекрытия лучей парциальных ДНА и количество соседних каналов уплотняемых на один общий усилительно-преобразовательный тракт.

Результаты количественных оценок точности определения координат объектов простой и сложной конфигурации [4] показывают, что применение матричных РМ КЭСН позволяет обеспечить повышение точности определения координат (снижение СКО), по сравнению с многоканальными системами с уплотнением каналов, до 2,5 раз.

Выводы

Таким образом, обоснованы пути практической реализации малогабаритных информационных датчиков внешнего поля, которые могут быть использованы в высокоточных всепогодных системах навигации высокоскоростных летательных аппаратов.

Разработаны принципы построения матричных радиометрических систем миллиметрового диапазо-

на, призначених для формування зображень наземних об'єктів на борту летальних апаратів різного призначення.

Формування двумерних радіометричних зображень за мале час експозиції (доли секунди) можливо як завдяки використанню матриць РМ інформаційних датчиків, так і за рахунок використання багатоканалних РМД на основі ущільнення каналів з розподілом по формі сигналів з використанням функцій Уолша.

Результати кількісних оцінок показують, що точність визначення координат об'єктів простої та складної геометричної форми, забезпечувана матричними РМ системами ММД, становить одиниці метрів.

В роботі [4] обґрунтовується більш висока надійність роботи КЭСН міліметрового діапазону в несприятливих погодних умовах, в умовах слабкої освітленості, порівняно з системами видимого та інфрачервоного діапазонів хвиль. Підтверджується висока криптичність роботи вказаних систем ввиду малого часу роботи на випромінювання. Приводяться методи компенсації потужної узкополосної поєми в вхідних каскадах приймача, що суттєво підвищує помехостійкість систем і, в результаті, забезпечує високу необхідну помехозахищеність РМ КЭСН.

В вказаній роботі так же оцінюється швидкість роботи матричних РМ КЭСН (матричного радіометричного датчика ММД та спеціалізатора), яка задовольняє сформульованим вимогам і становить десяті часті секунди.

Список літератури

1. Системи формування зображень в фокальній площині в міліметровому діапазоні довжин хвиль / Голдміс П.Ф. та ін. [Текст] // ТИИЭР – 1993.— Т. 41. – № 10. – С. 1-24.
2. Passive multichannel millimeter-waves imaging system / V.P. Gorishniak, A.G. Denisov, S.E. Kuzmin, V.N. Radzikhovskiy, B.M. Shevchuk [Text] // The Fifth International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of

Microwaves, millimeter and Submillimeter Waves. Symposium Proceedings. – V.1. Kharkov, Ukraine, June 21 – 26, 2004. – P. 202-204.

3. Multielement reception matrix system 8 mm range for tasks passive radio vision [Text] / V.B. Khaikin, A.A. Storozhenko, M.K. Lebedev, V.N. Radzikhovskiy, S.E. Kuzmin, C.V. Shlensin // «Journal of Radio electronics», 2014. – N 2. – 10 p.
4. Матричні радіометричні кореляційно-екстремальні системи навігації летальних апаратів: Монографія [Текст] / В.І. Антюфеев, В.Н. Быков, А.М. Гричанюк, Д.Д. Іванченко, Н.Н. Колчигін, В.А. Крайшкін, А.М. Сотников. – Х.: Изд-во ООО «Щедра усадьба плюс», 2014. – 372 с.
5. Теорія кореляційно-екстремальних навігаційних систем [Текст] / А.А. Красовський, І.Н. Белоглазов, Г.П. Чигін. – М.: Наука, 1979. – 448 с.
6. Бердєшєв В.І., Костюсов В.Б. Екстремальні задачі та моделі навігації по геофізическим полям [Текст] / Научне видання. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. – 270 с.
7. Баклицкий В.К. Кореляційно-екстремальні методи навігації та наведення [Текст]. – Тверь: ТО «Книжний клуб», 2009. – 360 с.
8. Антенно-фідерні пристрої [Текст] / А.Л. Драбкін, В.Л. Зуєнко, А.Г. Кислов. – М.: Сов. Радио, 1974. – 536 с.
9. Уолтер Л.Х. Антени безушкої хвилі. Пер з англ. Під ред. А.Ф. Чапліна [Текст]. – М.: Энергія, 1970. – 448 с.
10. Розширюючіся цільові антени осевого випромінювання на діелектричних підложках [Текст] / С.Н. Гребенников // Радіотехніка СВЧ. – № 40, 1986. – С. 1-81.
11. Авторське свідоцтво 784673 СССР. Спосіб виготовлення хвильоводної лінзи [Текст] / Л.Л. Балашиов, Е.М. Бороховський, В.Н. Быков, Б.І. Макаренко, Ю.В. Овсянников, А.С. Султанов; Заявлено 9.11.78; Опубліковано 1.08.1980. – 4 с.
12. Методика розрахунок характеристик двохзеркальної антени з матричним облучателем [Текст] / В.І. Антюфеев, В.Н. Быков, Т.Д. Бережєна, А.М. Гричанюк, В.А. Крайшкін, М.Г. Шокин // Системи обробки інформації. – Х.: Харківський університет повітряних сил, 2007. – Вип. 3(61). – С. 2-8.

Поступила в редакцію 22.12.2015

Рецензент: д-р фіз.-мат. наук, проф. С.Н. Шульга, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків.

МАЛОГАБАРИТНІ ВСЕПОГОДНІ ДАТЧИКИ ЗОВНІШНЬОГО ПОЛЯ ДЛЯ СИСТЕМ НАВІГАЦІЇ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

В.М. Биков, Д.Д. Іванченко, М.М. Колчигін, В.О. Крайшкін, Г.Г. Осиновий, В.М. Радзіховський

Обґрунтовані шляхи практичної реалізації малогабаритних інформаційних датчиків зовнішнього поля, які можуть бути застосовані у високоточних всепогодних системах навігації літальних апаратів різного призначення. Розроблені принципи побудови матричних радіометричних кореляційно-екстремальних систем міліметрового діапазону, які призначені для формування і обробки зображень наземних об'єктів за малий час експозиції.

Ключові слова: літальний апарат, матрична радіометрична кореляційно-екстремальна система навігації, міліметровий діапазон.

SMALL-SIZED WEATHERPROOF EXTERNAL FIELD SENSORS FOR NAVIGATION SYSTEMS OF AIRCRAFT

V.M. Bykov, D.D. Ivanchenko, N.N. Kolchigin, V.A. Krayushkin, G.G. Osinovy, V.N. Radzikhovskiy

The ways of practical realization of compact sensors external information fields, which can be used in all weather high precision navigation systems of flying vehicles for various purposes. The principles of constructing a matrix of radiometric correlation-extreme systems of millimeter range, intended for the formation and processing of images of ground objects in a short exposure time (fraction of seconds).

Keywords: aircraft, matrix radiometry correlation-extreme system of navigation, millimetric range.